

周勤利, 王学东, 李志涛, 等. 宁夏贺兰县土壤重金属分布特征及其生态风险评价[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(4): 513-521.

ZHOU Qin-li, WANG Xue-dong, LI Zhi-tao, et al. Distribution characteristics and ecological risk assessment of soil heavy metal in Helan County of Ningxia, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(4): 513-521.

## 宁夏贺兰县土壤重金属分布特征及其生态风险评价

周勤利<sup>1</sup>, 王学东<sup>1</sup>, 李志涛<sup>2\*</sup>, 王夏晖<sup>2</sup>, 何俊<sup>2</sup>, 季国华<sup>2</sup>

(1. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048; 2. 生态环境部环境规划院, 北京 100012)

**摘要:**为研究西北地区农田土壤重金属分布特征及其生态风险,以宁夏贺兰县为研究区,采集农田表层土壤样品140个,分析测试了Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd和Pb含量,并采用内梅罗综合污染指数和Håkanson潜在生态风险指数法进行了重金属生态风险评价。结果表明:宁夏贺兰县农田表层土壤Cr、Ni、Cu、Zn、As和Pb元素均低于国家土壤环境二级标准,仅有1.42%样点的Cd元素出现超标;与宁夏土壤背景值相比,各元素都有不同程度的累积,其中Cd和Ni元素超出背景值的点位率分别达到100%和85%;土壤各重金属元素的分布特征较为一致,各元素含量分布比较均匀,高值区集中在中部和东部地区,主要受人类活动的影响。单因子污染指数分析结果表明,Cd元素有0.71%的点位为中度污染水平,Ni和As分别有7.14%和5%的点位处于尚清洁水平,Cr、Cu、Zn、Pb全部清洁,尚未造成污染。重金属的单项生态风险指数( $E_i^r$ )表明,Cd元素的平均潜在生态风险指数为97.68,达强烈风险水平,是最主要的生态风险元素。宁夏贺兰县农田土壤环境质量整体良好,Cd和Ni累积严重,值得关注。

**关键词:**宁夏;土壤;重金属;分布特征;潜在生态风险

中图分类号:X53

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2019)04-0513-09

doi: 10.13254/j.jare.2018.0191

### Distribution characteristics and ecological risk assessment of soil heavy metal in Helan County of Ningxia, China

ZHOU Qin-li<sup>1</sup>, WANG Xue-dong<sup>1</sup>, LI Zhi-tao<sup>2\*</sup>, WANG Xia-hui<sup>2</sup>, HE Jun<sup>2</sup>, JI Guo-hua<sup>2</sup>

(1. College of Resource, Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 2. Chinese Academy of Environmental Planning, Beijing 100012, China)

**Abstract:** Ningxia Helan County was taken as the research area in this paper to study the distribution characteristics and ecological risk of heavy metals in farmland soil in northwest China. 140 topsoil samples were collected aiming to analyze and measure the concentration of Cr, Ni, Cu, Zn, As, Cd and Pb belonging to heavy metal elements. The distributions, soil environment status and ecological risk of the seven heavy metals were studied by Nemerow pollution index and Håkanson potential ecological risk index methods. The results showed that concentrations of Cr, Ni, Cu, Zn, As and Pb were all lower than the second-level of Environmental Quality Standard for Soils of China except that concentrations of Cd of 1.42% samples were appeared to exceed the standard. Compared with the background values, seven heavy metals of all samples showed different degree accumulation, in which Cd, Ni elements beyond the background value ratio reached 100% and 85%. Spatial distribution of the concentrations of the seven heavy metals had obvious accordance. The content of each element was evenly distributed. The high content of each element was concentrated in the central and eastern part of Helan County, which was related to human activities. The calculation results of single-factor pollution index showed that among the 140 soil samples, 0.71% of Cd were moderate contamination, 7.14% of Ni and 5% of As were slight clean, Cr, Cu, Zn, Pb of all samples were all clean. According to the individual potential ecological risk index ( $E_i^r$ ) of heavy metals, the average potential ecological risk index of Cd element was 97.68, which indicated that Cd had reached the serious risk level, becoming the main element of potential ecological risk. All in all, the quality of farmland soil in Helan County of Ningxia is good, but it is noteworthy that the concentration of Cd, Ni has a serious accumulation.

**Keywords:** Ningxia; soil; heavy metal; distribution characteristics; potential ecological risk

收稿日期: 2018-07-23

录用日期: 2018-10-29

作者简介: 周勤利(1994—), 女, 山东济南人, 硕士研究生, 主要从事土壤污染调查与评价研究。E-mail: zql7525820@126.com

\*通信作者: 李志涛 E-mail: lizt@caep.org.cn

基金项目: 环保部公益性项目(201509044)

Project supported: Ministry of Environmental Protection Public Welfare Project(201509044)

近年来,随着人口的快速增长、工业的迅速发展<sup>[1-4]</sup>以及农药与化肥的广泛施用<sup>[5-6]</sup>,大量的重金属污染物通过污水灌溉<sup>[7-10]</sup>、大气干湿沉降<sup>[6,11]</sup>和污泥农用<sup>[12-13]</sup>等途径进入土壤环境,导致土壤污染日益严重,对农产品质量安全与人类健康产生了影响<sup>[14-16]</sup>。过量的重金属危害极大,毒性极强,对环境、生态系统和人类都有较大的威胁,例如Cd在土壤中过量存在会导致植物生长缓慢,并可以通过生物富集和食物链进入人体,对人体健康产生威胁<sup>[17]</sup>。基于此,土壤重金属的累积日益受到国内外学者和政府部门的关注,并进行了大量的调查和研究评价工作。

据环保部和国土部公报显示,我国土壤污染点位超标率为16.1%,南方土壤污染重于北方,长三角、珠三角和东北老工业基地等部分区域土壤污染问题较为突出<sup>[18]</sup>。宁夏位于我国西北部的黄河上游地区,随着近些年矿业开采、污水灌溉的发展,土壤中也出现了重金属累积的现象。樊新刚等<sup>[19]</sup>分析了宁夏石嘴山河滨工业园区表层土壤的重金属含量,发现土壤中Cu、Cd污染较重,Cr、Zn和Pb污染较轻。王美娥等<sup>[15]</sup>以宁夏某枸杞种植地为研究对象的调查评价发现,土壤中Zn、Cd、Cu、Mn、Pb元素累积明显。罗成科等<sup>[20]</sup>对宁东基地不同工业园区周边土壤重金属污染特征进行了分析,发现元素Cd、Cr、Pb、Hg受工业园区影响呈现明显的累积趋势。潘佳颖等<sup>[21]</sup>对贺兰山东麓葡萄主产区土壤中重金属含量的分析发现,元素Cu、Cr含量超过宁夏土壤背景值,Cu、Cr、Ni达到轻度污染水平。贺兰县是宁夏北部引黄灌区的核心区,农业基础雄厚,素有“塞上江南”之美誉,是全国粮食生产先进县、中国果菜无公害十强县、中国西部四季鲜菜之乡,2010年被农业部确定为全国首批51个国家级现代农业示范区之一<sup>[22]</sup>,因此有必要系统掌握贺兰县土壤环境质量状况,但近几年有关贺兰县土壤重金属情况的报道较少<sup>[23-26]</sup>。鉴于此,本研究通过大量实测数据,对宁夏贺兰县农田土壤重金属含量状况进行评价,旨在为农业生产的合理开发和规划提供科学依据,同时为生态环境的保护、水土资源的合理利用与管理提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

贺兰县位于我国西北内陆,宁夏回族自治区北部,105°53′~106°38′E,38°26′~38°54′N之间,属于青铜峡引黄灌区,东临黄河,西倚贺兰山,南与银川市

郊为邻,北与平罗县接壤。土地总面积约占宁夏总面积的2.33%。贺兰县地势西高东低,总趋势由西南向东北倾斜,全县地貌自西向东大致分为贺兰山地、山前洪积平原、黄河近代冲积平原及其他风沙地和黄河水面,属温带大陆性气候,降水少而蒸发强烈,多年平均降水量138.8 mm。

贺兰县主要灌溉方式为黄河水漫灌,而宁夏段的黄河水质污染逐年加重,且部分乡镇由于灌溉水资源不足和高阶地引水困难,选择抽取排水沟的水进行灌溉,而农田排水沟接纳了大量农田使用的化肥和农药以及生活和工业污水<sup>[27]</sup>,其水质已不符合农田灌溉水标准<sup>[28]</sup>。贺兰县的新平污灌区位于县城东北方向,距离县城约3 km,包括习岗镇2个村,立岗镇4个村和金贵镇2个村,耕地面积约1100 hm<sup>2</sup>,主要种植春小麦、玉米和水稻。该污灌区以汉延渠为引水渠,每年初春,因渠水不足,当地村民抽取银新干沟污水补入汉延渠<sup>[29]</sup>,为间歇性清污混灌区,混合水污清比约为0.1~0.2,混合后水质良好<sup>[28]</sup>,但农作物有不同程度的减产。如今,贺兰县农田的污灌历史已长达30多年,为了进一步了解当地农田土壤的环境质量状况,特进行了取样调查研究。

### 1.2 样品的采集与处理

土壤样品采集覆盖整个贺兰县,面积大约为1599 km<sup>2</sup>,包括4镇1乡3农场。具体采样点以2 km×2 km的网格为基础布点,然后根据地形、土地利用类型并结合卫星影像和行政区划进行调整,遇到明显污灌处采样进行加密处理。由于本研究区域为贺兰县农业用地范围,主要采集农田及其周边土壤,而西北地区以山地林地为主,农业用地少,所以洪广镇西北部采样点稀疏。最终采样点设置为习岗镇13个、金贵镇19个、立岗镇25个、洪广镇34个、常信乡30个、3个独立农场19个,共140个采样点,采样点具体分布见图1。

采集0~20 cm的表层土壤,每个样品采用5点混合法,用四分法取约1 kg的样品,保存在密封袋内带回实验室。自然风干后取100 g,用木质工具碾碎并用玛瑙研钵研磨、混匀过筛后保存,用于土壤理化性质及重金属含量分析。

### 1.3 样品的分析与测试

土壤各项理化指标的测定均采用常规方法<sup>[30]</sup>:土壤pH值采用电位法(水:土=2.5:1),有机质采用重铬酸钾容量法,速效磷采用碳酸氢钠法,速效氮采用扩散吸收法,速效钾采用四苯硼钠比浊法,全磷采用

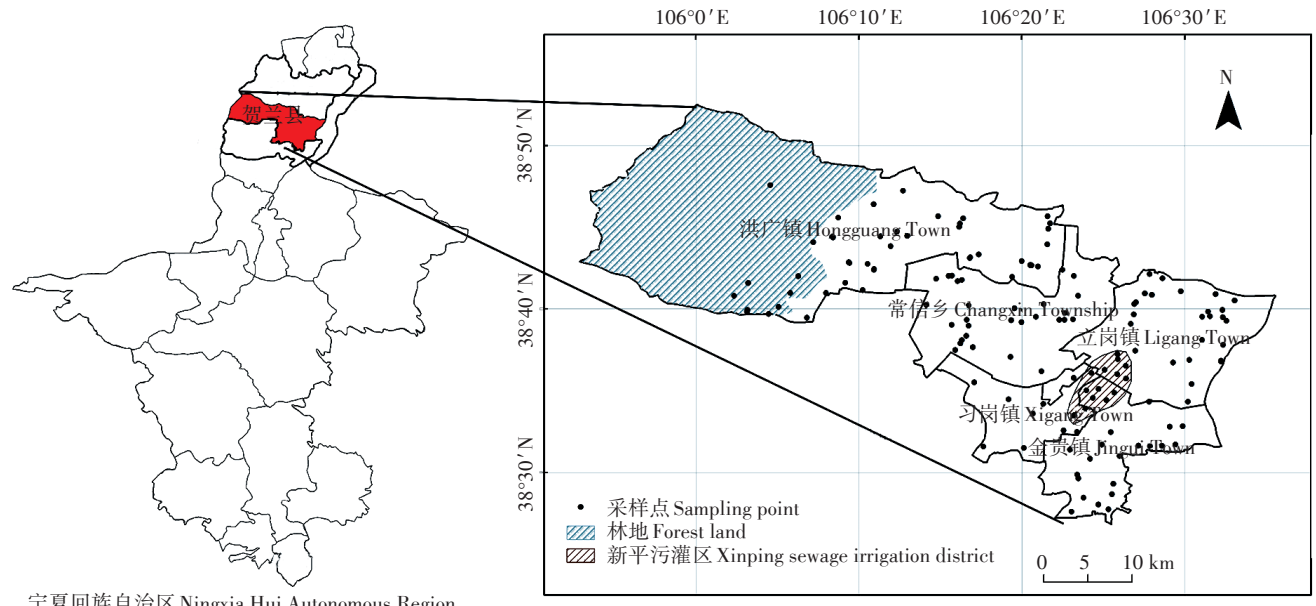


图1 研究区域及采样点分布图

Figure 1 Study area and distribution of sampling points

HClO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>法,全氮用开氏法,全钾用火焰光度法。测得的土壤基本理化性质:pH 7.9~8.5,有机质 10.84~20.49 g·kg<sup>-1</sup>,全氮 0.88~1.13 g·kg<sup>-1</sup>,全磷 0.38~0.65 g·kg<sup>-1</sup>,全钾 15.8~24.99 g·kg<sup>-1</sup>,速效磷 12.92~21.24 mg·kg<sup>-1</sup>,速效氮 49.64~90.15 mg·kg<sup>-1</sup>,速效钾 104.54~163.27 mg·kg<sup>-1</sup>。

土壤中重金属元素 Cr、Ni、Cu、Zn、Cd、Pb 采用微波消解和电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS,安捷伦 7500)测定,As 元素采用微波消解和火焰原子吸收分光光度法测定。测定时土壤标样选用国家标准土壤样品(GBW07408)进行参比。

1.4 数理统计方法

数据正态分布检验采用 SPSS 16.0 软件,空间插值分析采用 ArcGIS 10.2 软件。

1.5 评价方法

1.5.1 土壤重金属评价

单因子污染指数法是对土壤中单一污染元素的指数进行测算和评价的方法,其公式为:

$$P_i = \frac{x_i}{s_i}$$
(1)

式中: $P_i$ 为污染物*i*的污染指数; $x_i$ 为污染物*i*的实测值,mg·kg<sup>-1</sup>;  $s_i$ 为污染物*i*的评价标准,mg·kg<sup>-1</sup>。

$P_i \leq 1$ 时,未受污染, $P_i > 1$ 时,受到污染, $P_i$ 越大,污染越重。

内梅罗综合污染指数法综合考虑了单因子污染指数的平均值和最高值,能较全面地反映环境质量,

其公式为:

$$P_{综} = \sqrt{[P_{imax}^2 + P_{iave}^2] / 2}$$
(2)

式中: $P_{综}$ 为综合污染指数; $P_{imax}$ 为参与评价的重金属元素中的单因子污染指数最大值; $P_{iave}$ 为重金属元素的单因子污染指数平均值。土壤重金属污染评价分级具体见表1。

1.5.2 生态风险评价

采用 Håkanson 潜在生态风险指数法<sup>[31]</sup>评价贺兰县土壤重金属风险程度,计算公式为:

$$C_f^i = \frac{C^i}{C_n^i}$$
(3)

$$E_r^i = T_r^i \times C_f^i$$
(4)

$$RI = \sum_{i=1}^m E_r^i$$
(5)

式中: $C_f^i$ 为单项污染系数; $C^i$ 为样品中污染物*i*的实测值,mg·kg<sup>-1</sup>;  $C_n^i$ 为污染物*i*的参比值(采用宁夏土壤背景值<sup>[32]</sup>),mg·kg<sup>-1</sup>;  $E_r^i$ 为污染物*i*的单项潜在生态风险

表1 土壤重金属污染评价分级表

Table 1 Grading of soil pollution of heavy metals

| 等级划分<br>Grading | $P_{综}$              | 污染等级<br>Pollution degree | 污染水平<br>Pollution level |
|-----------------|----------------------|--------------------------|-------------------------|
| I               | $P_{综} \leq 0.7$     | 安全                       | 清洁                      |
| II              | $0.7 < P_{综} \leq 1$ | 警戒线                      | 尚清洁                     |
| III             | $1 < P_{综} \leq 2$   | 轻污染                      | 土壤轻度污染,作物已受污染           |
| IV              | $2 < P_{综} \leq 3$   | 中度污染                     | 土壤、作物均受中度污染             |
| V               | $P_{综} > 3$          | 重度污染                     | 土壤、作物已严重污染              |



指数;  $T_i^i$  为污染物  $i$  的毒性系数, Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Pb 的毒性系数分别为 5、30、2、10、5、5、1<sup>[33]</sup>; RI 为综合潜在生态风险指数。

$E_i^i$  和 RI 可分别评价某种污染物和多种污染物的潜在生态风险程度, 等级划分标准<sup>[33]</sup>:  $E_i^i \leq 30$  或  $RI \leq 135$  为轻微生态风险,  $30 < E_i^i \leq 60$  或  $135 < RI \leq 265$  为中等生态风险,  $E_i^i > 60$  或  $RI > 265$  为强烈生态风险;  $C_j^j \leq 1$  为轻微污染,  $1 < C_j^j \leq 3$  为中等污染,  $3 < C_j^j \leq 6$  为强烈污染,  $C_j^j > 6$  为极强污染。

## 2 结果与讨论

### 2.1 贺兰县土壤重金属含量总体状况

贺兰县农田土壤中 Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Pb 元素的平均含量分别为 40.18、28.86、21.14、58.74、11.82、0.35  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和 16.66  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  (表 2), 分别为宁夏土壤背景值<sup>[32]</sup>的 0.64、1.33、0.96、1、0.97、3.21 倍和 0.81 倍, 其中 Cd、Ni 元素超出背景值的点位率分别为 100% 和 85%, Pb、Cr 元素超出背景值的点位率分别为 12.14% 和 2.86%, 其他元素超出背景值的点位率为 37.14%~42.86%。与国家土壤环境质量二级标准 (GB 15618—1995)<sup>[34]</sup>相比, Cr、Ni、Cu、Zn、As、Pb 6 种元素均未超标, Cd 元素有 2 个点位超标, 其最大值为 1.33  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 是土壤环境质量标准的 2.2 倍。与 19 年前在贺兰县污灌区测得的土壤重金属结果<sup>[29]</sup>相比, Pb 含量增长了 0.81 倍, Cd 含量增长了 3.86 倍。上述结果表明, 贺兰县土壤中 7 种重金属元素具有较明显的累积趋势, Cd 元素尤为明显。变异系数可以对不同量纲的指标进行比较<sup>[35]</sup>, 根据 Wilding<sup>[36]</sup>对变异程度的分类, 元素 Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Pb 的变异系数介于 17%~34% 之间, 属于中等变异, 表明贺兰县农田土壤中以上重金属元素在空间上具有一定的离散程度, 其含量

变化受成土母质和人类活动的双重影响。

由表 2 可以看出, 宁夏土壤背景值含量远远低于国家土壤环境质量二级标准, 表明调查区土壤重金属的累积主要来自于人为活动。首先是灌溉水源的影响, 贺兰县农田主要引黄河水灌溉和排水沟污灌, 黄河水的水质污染逐年加重<sup>[27]</sup>, 排水沟接纳了大量的城市生活污水、工业废水和农田退水<sup>[37]</sup>, 当地主要排水沟银新干沟的水质为劣 V 类<sup>[28]</sup>, 已不符合农田灌溉标准, 排水沟的水最终排入黄河, 进一步加剧了黄河水的污染。当地农民长期引污水灌溉农田, 造成土壤中重金属的累积。其次, 农田化肥和畜禽粪尿的施用也对土壤中重金属累积有一定影响<sup>[38]</sup>, Luo 等<sup>[39]</sup>对我国农业土壤重金属来源的研究表明, 我国畜禽粪便中的 Cd 含量为 1.3~3.8  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 各种类型化肥中的 Cd 含量为 0.05~3  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 而当地村民进行畜禽养殖, 除了向农田施用化肥, 还会施用畜禽粪便腐熟的农家肥, 长此以往加剧了农田土壤重金属的累积。所以污水灌溉、农田化肥和畜禽粪便的长期施用可能是影响当地农田土壤重金属累积的主要因素。

### 2.2 贺兰县土壤重金属的空间分布特征

为了更好地分析重金属含量的空间分布特征, 采用地统计学的方法并结合 ArcGIS 软件中的地统计分析模块对调查区土壤中各重金属含量进行插值分析。此分析要求数据符合正态分布或近似正态分布, 故而采用 SPSS 16.0 对数据进行 K-S 正态分布检验, 检验结果 (表 3) 表明, Cu、Zn、As 和 Pb 呈正态分布, Ni 和 Cd 呈对数正态分布, 而 Cr 既不呈正态分布也不呈对数正态分布。考虑 Cr 元素中可能存在异常值, 因此将异常值剔除后再进行正态检验, 结果显示 Sig=0.01, 仍然不服从正态分布。

利用 ArcGIS 软件中的地统计分析模块, 选取各

表 2 宁夏贺兰县土壤重金属含量的描述性统计

Table 2 Descriptive statistics of concentrations of soil heavy metals in Helan County of Ningxia

| 项目 Items                                       | Cr     | Ni    | Cu    | Zn    | As    | Cd    | Pb    |
|------------------------------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 最大值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$          | 102.61 | 59.78 | 40.52 | 84.59 | 21.34 | 1.33  | 23.87 |
| 最小值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$          | 8.72   | 9.65  | 7.93  | 21.14 | 1.10  | 0.12  | 6.09  |
| 平均值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$          | 40.18  | 28.86 | 21.14 | 58.74 | 11.82 | 0.35  | 16.66 |
| 标准差/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$          | 13.57  | 7.88  | 4.86  | 10.37 | 2.73  | 0.11  | 2.81  |
| 变异系数/%                                         | 34     | 27    | 23    | 18    | 23    | 32    | 17    |
| 土壤环境质量二级标准限值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ | 250    | 60    | 100   | 300   | 25    | 0.6   | 350   |
| 点位超标率/%                                        | 0      | 0     | 0     | 0     | 0     | 1.42  | 0     |
| 宁夏土壤背景值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$      | 62.7   | 21.7  | 22.1  | 58.8  | 12.2  | 0.109 | 20.60 |
| 超出背景值的点位率/%                                    | 2.86   | 85.00 | 37.14 | 42.86 | 36.43 | 100   | 12.14 |

重金属含量数据进行普通克里金插值,通过选用不同模型进行交叉验证,选取标准平均值最接近于0、标准均方根预测误差最接近于1、平均标准误差最接近均方根预测误差、均方根预测误差最小的模型为最优模型<sup>[40]</sup>,最终确定球面函数模型作为各元素的插值模型生成预测表面,其中Ni、Cd元素在插值前进行了对数转换处理。最终绘制出贺兰县土壤重金属元素(Cr元素除外)的空间分布图(图2)。

整体来看,贺兰县各重金属含量分布比较均匀,各重金属含量高值区主要分布在贺兰县中部和东部,

东部位于黄河近代冲积平原上,地形平坦,耕地多,居民多,交通发达,工厂集中,人类活动频繁,因此贺兰县中东部重金属含量相对较高。具体到每个元素:土壤中Cu、Ni元素浓度较高的地区主要分布在贺兰县的中部和东南部,包括洪广镇东部、常信乡中部、金贵镇中东部及新平污灌区;As元素浓度较高的地区位于贺兰县中部,包括洪广镇东部、常信乡中东部、立岗镇西部、金贵镇西北部和习岗镇,浓度最高的地区出现在新平污灌区;Pb、Zn元素分布相似,整体比较均匀,高浓度区域集中于常信乡东北部,常信乡东北部

表3 宁夏贺兰县土壤重金属元素含量的正态分布检验

Table 3 Normal distribution test of soil heavy metal elements in Helan County of Ningxia

| 项目 Items           | Cr    | Ni    | Cu    | Zn    | As    | Cd    | Pb    |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 正态分布 Sig(2-tailed) | 0.016 | 0.007 | 0.750 | 0.358 | 0.193 | 0.004 | 0.078 |
| 对数转换 Sig(2-tailed) | 0     | 0.204 | —     | —     | —     | 0.380 | —     |

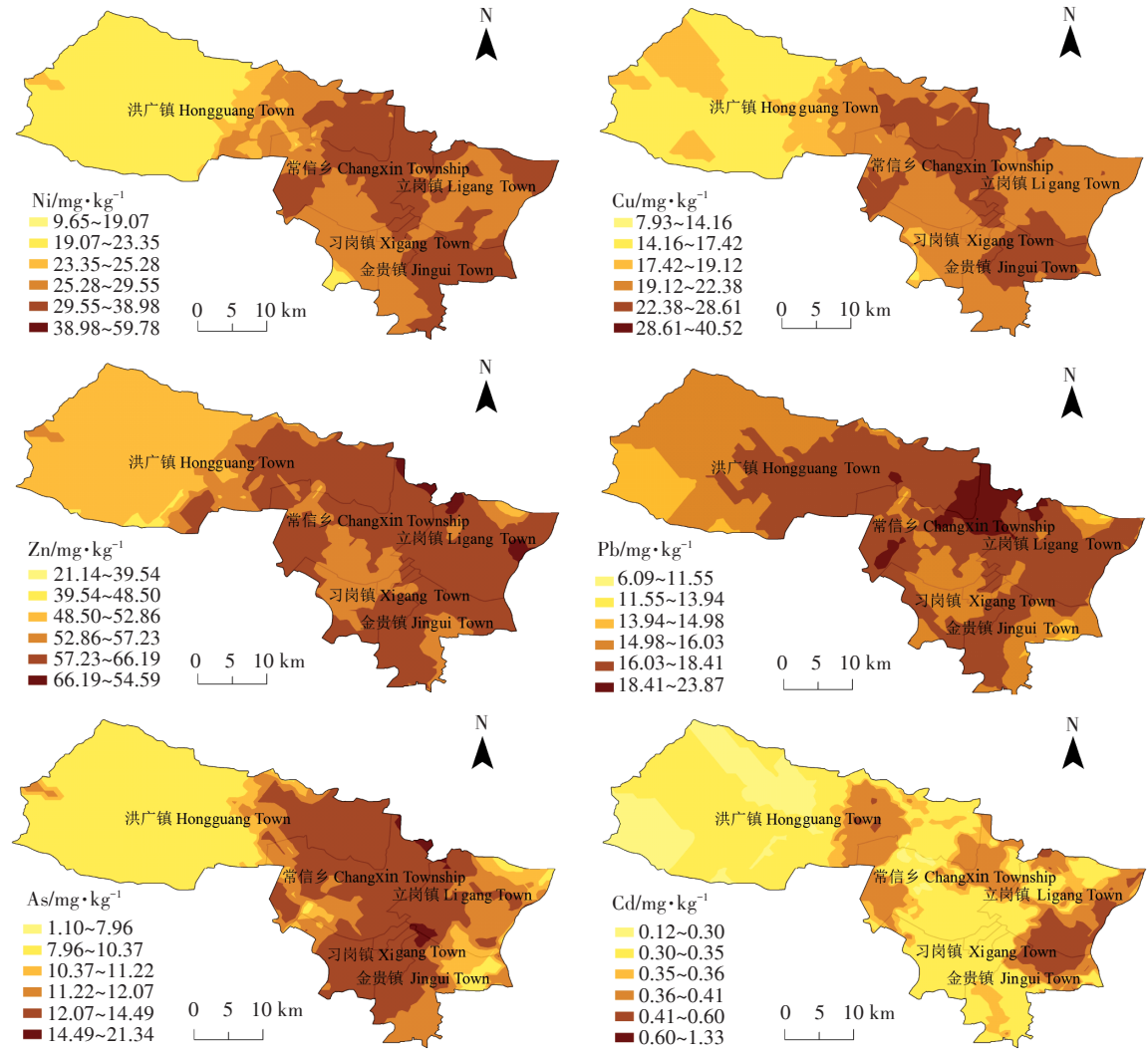


图2 宁夏贺兰县土壤各重金属含量空间分布

Figure 2 Spatial distribution of concentration of soil heavy metals in Helan County of Ningxia

有两条主要交通干道穿过,交通活动频繁,汽油和燃油添加剂在汽车运行中产生的颗粒物会通过大气进入土壤,导致土壤中Pb、Zn含量升高;Cd元素高浓度区域位于立岗镇与金贵镇交界处,中部和西部呈斑块分布,立岗镇与金贵镇交界处行政村分布集中,家家户户都有畜禽养殖,畜禽粪便腐熟的农家肥是村民向农田施用的主要肥料,长此以往造成土壤中Cd元素的累积;由于Cr元素数据及其转换数据均不满足正态分布,未进行空间插值处理,只对其进行了分级符号显示(图3),由图3可以看出,Cr元素分布比较均匀,中部和东南部浓度较高。

### 2.3 土壤重金属评价

根据国家土壤环境质量标准(GB 15618—1995)<sup>[34]</sup>对贺兰县土壤中的重金属进行污染指数评价,其结果见表4、表5。

由单因子污染指数法得出,各元素总体处于清洁水平,其中Cr、Cu、Zn、Pb全部清洁,没有造成污染;Ni、As、Cd分别有92.86%、95.00%和83.57%的点位处于清洁水平,有7.14%、5.00%和15.00%的点位处于尚清洁水平;Cd有0.71%的点位为轻污染,0.71%的点位为中度污染。采用内梅罗综合污染指数法,得出研究区土壤质量属于Ⅲ级轻微污染水平。

### 2.4 生态风险评价

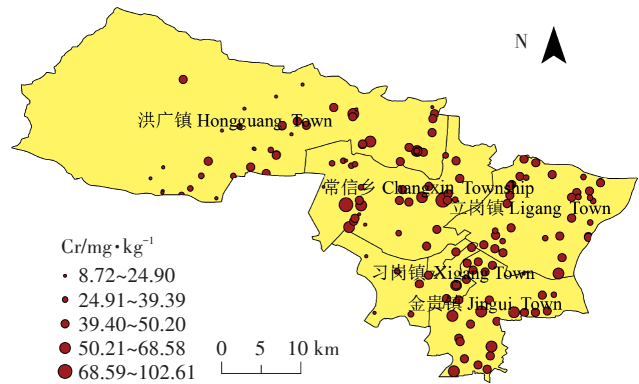


图3 宁夏贺兰县土壤Cr元素空间分布

Figure 3 Spatial distribution of concentration of Cr element in Helan County of Ningxia

以宁夏土壤背景值<sup>[32]</sup>作为参比值,按照Hakanson潜在生态风险评价相关公式计算得到贺兰县土壤中各重金属元素的 $C_f^i$ 、 $E_r^i$ 和RI值(表6)。

从重金属单项污染系数( $C_f^i$ )来看(表6、表7),贺兰县农田土壤中Cd元素有56.43%的点位为强烈污染,42.14%的点位为中等污染;Ni元素和Zn元素分别有85.00%和42.86%的点位为中等污染;Cu元素和As元素分别有37.14%和36.43%的点位为中等污染。各个重金属的潜在污染程度为Cd>Ni>Zn>As>Cu>Pb>Cr。

从重金属单项潜在生态风险指数( $E_r^i$ )来看(表6、

表4 宁夏贺兰县土壤重金属元素单因子污染状况比例(%)

Table 4 Single factor pollution ratio of soil heavy metal elements in Helan County of Ningxia (%)

| 元素(样品个数)<br>Element (Number of Samples) | I (清洁 Clean) | II (尚清洁 Slight clean) | III (轻污染 Light pollution) | IV (中度污染 Moderate pollution) | V (重污染 Heavy pollution) |
|-----------------------------------------|--------------|-----------------------|---------------------------|------------------------------|-------------------------|
| Cr(n=140)                               | 100          |                       |                           |                              |                         |
| Ni(n=140)                               | 92.86        | 7.14                  |                           |                              |                         |
| Cu(n=140)                               | 100          |                       |                           |                              |                         |
| Zn(n=140)                               | 100          |                       |                           |                              |                         |
| As(n=140)                               | 95.00        | 5.00                  |                           |                              |                         |
| Cd(n=140)                               | 83.57        | 15.00                 | 0.71                      | 0.71                         |                         |
| Pb(n=140)                               | 100          |                       |                           |                              |                         |

表5 宁夏贺兰县土壤重金属污染指数

Table 5 Pollution index of soil heavy metals in Helan County of Ningxia

| 项目 Items  | Cr    | Ni    | Cu    | Zn    | As    | Cd    | Pb    | 综合 Comprehensive |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------------------|
| 样本数       | 140   | 140   | 140   | 140   | 140   | 140   | 140   |                  |
| 单项污染指数平均值 | 0.151 | 0.481 | 0.203 | 0.196 | 0.498 | 0.591 | 0.048 |                  |
| 单项污染指数最小值 | 0.035 | 0.161 | 0.071 | 0.070 | 0.044 | 0.195 | 0.017 |                  |
| 单项污染指数最大值 | 0.410 | 0.996 | 0.405 | 0.282 | 0.984 | 2.215 | 0.068 |                  |
| 内梅罗综合污染指数 |       |       |       |       |       |       |       | 1.621            |
| 污染级别(程度)  |       |       |       |       |       |       |       | Ⅲ级(轻微污染)         |

注:污染指数根据国家土壤环境质量二级标准计算。

Note: The pollution index were calculated according to the second-level of Environmental Quality Standard for Soils of China.

表7),宁夏贺兰县土壤中的Cd元素有98.57%的样点存在强烈风险,它对重金属综合潜在生态风险的贡献率达到78.07%,是最主要的生态风险重金属,其余重金属都属于轻微的潜在生态风险,各重金属潜在生态风险的次序为Cd>As>Ni>Cu>Pb>Cr>Zn。各重金属的综合潜在生态风险指数(表6)表明,7种重金属潜在生态风险指数RI为46.47~392.06,平均值为125.12,由此推知,贺兰县农田土壤重金属有轻微的潜在生态风险。

根据计算得到的综合潜在生态风险指数(RI)绘制了贺兰县土壤重金属综合潜在生态风险分布图(图4),从图4中可以看出,贺兰县大部分地区有轻微的潜在生态风险,呈强烈潜在生态风险的地区集中于Cd元素浓度的高值区,呈中等潜在生态风险的地区分布在高值区周围,以及洪广镇中部,常信乡西部、东

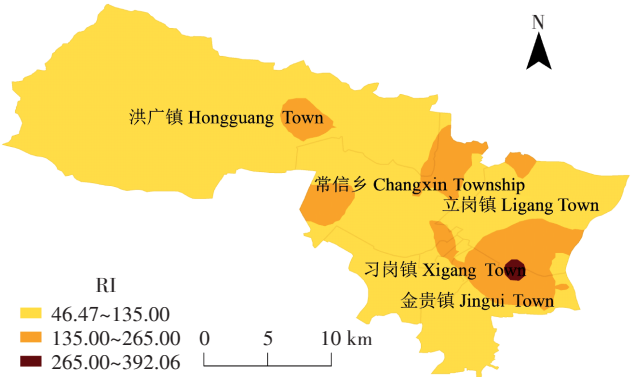


图4 宁夏贺兰县土壤重金属综合潜在生态风险指数分布  
Figure 4 Spatial distribution of comprehensive potential ecological risk index of soil heavy metals in Helan County of Ningxia

北部和立岗镇北部的小部分地区,呈不规则斑块状分布,对比Cd元素空间分布图可知,其分布与Cd元素的空间分布极其相似,表明贺兰县土壤的潜在生态风险主要受Cd元素影响,进一步证实Cd元素是贺兰县最主要的生态风险元素。

3 结论

(1)贺兰县农田土壤Cr、Ni、Cu、Zn、As、Pb元素含量均低于国家土壤环境质量二级标准,仅有1.42%的样点Cd元素出现超标。与宁夏土壤背景值相比,7种重金属元素都有不同程度的累积,其中Cd元素累积最明显。

(2)贺兰县农田土壤Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Pb含量整体分布比较均匀,高值区分布在贺兰县中部和东部,主要受污水灌溉等人类活动影响。单因子污染指数表明,Cr、Cu、Zn、Pb元素没有造成污染,土壤属清洁水平,Cd元素累积明显,已对土壤构成一定威胁。整体土壤质量属于Ⅲ级轻微污染。

表6 宁夏贺兰县土壤重金属潜在生态风险评价

Table 6 Potential ecological risk assessment of soil heavy metals in Helan County of Ningxia

| 项目<br>Items |    | 最大值<br>Max value | 最小值<br>Min value | 平均值<br>Average |
|-------------|----|------------------|------------------|----------------|
| $C_p^i$     | Cr | 1.64             | 0.14             | 0.64           |
|             | Ni | 2.75             | 0.44             | 1.33           |
|             | Cu | 1.83             | 0.36             | 0.96           |
|             | Zn | 1.44             | 0.36             | 1.00           |
|             | As | 1.75             | 0.09             | 0.97           |
|             | Cd | 12.19            | 1.07             | 3.26           |
|             | Pb | 1.16             | 0.30             | 0.81           |
| $E_r^i$     | Cr | 3.27             | 0.28             | 1.28           |
|             | Ni | 13.77            | 2.22             | 6.65           |
|             | Cu | 9.17             | 1.79             | 4.78           |
|             | Zn | 1.44             | 0.36             | 1.00           |
|             | As | 17.49            | 0.90             | 9.69           |
|             | Cd | 365.81           | 32.15            | 97.68          |
|             | Pb | 5.79             | 1.48             | 4.04           |
| RI          |    | 392.06           | 46.47            | 125.12         |

表7 宁夏贺兰县  $C_p^i$ 、 $E_r^i$  土壤分级样点百分比(%)

Table 7 Percentage of sample points in different class of  $C_p^i$ ,  $E_r^i$  in Helan County of Ningxia(%)

| 重金属<br>Heavy metals | $C_p^i$                  |                            |                           |                        | $E_r^i$             |                       |                      |
|---------------------|--------------------------|----------------------------|---------------------------|------------------------|---------------------|-----------------------|----------------------|
|                     | 轻微污染<br>Slight pollution | 中等污染<br>Moderate pollution | 强烈污染<br>Intense pollution | 极强污染<br>High Pollution | 轻微风险<br>Slight risk | 中等风险<br>Moderate risk | 强烈风险<br>Intense risk |
| Cr                  | 97.14                    | 2.86                       | 0                         | 0                      | 100                 | 0                     | 0                    |
| Ni                  | 15.00                    | 85.00                      | 0                         | 0                      | 100                 | 0                     | 0                    |
| Cu                  | 62.86                    | 37.14                      | 0                         | 0                      | 100                 | 0                     | 0                    |
| Zn                  | 57.14                    | 42.86                      | 0                         | 0                      | 100                 | 0                     | 0                    |
| As                  | 63.57                    | 36.43                      | 0                         | 0                      | 100                 | 0                     | 0                    |
| Cd                  | 0                        | 42.14                      | 56.43                     | 1.43                   | 0                   | 1.43                  | 98.57                |
| Pb                  | 87.86                    | 12.14                      | 0                         | 0                      | 100                 | 0                     | 0                    |



(3)对照宁夏土壤背景值以及潜在生态风险评价结果可知,Cd元素潜在风险最大,其他元素存在轻微的潜在风险。由RI值推知,贺兰县土壤有轻微的重金属潜在生态危害。

研究表明,目前贺兰县的土壤环境质量良好,未产生明显污染。尽管如此,长期的污水灌溉、农田化肥和畜禽粪便的施用加剧了土壤中重金属元素的累积,今后应加强对污水灌溉等方面的监测,防止土壤环境质量下降。

#### 参考文献:

- [1] 谢团辉, 胡 聪, 陈炎辉, 等. 某炼钢厂周边农田土壤重金属污染状况的调查与评价[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(2): 155-160.  
XIE Tuan-hui, HU Cong, CHEN Yan-hui, et al. Investigation and evaluation of heavy metals pollution of agricultural soils near a steel plant [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, 35(2): 155-160.
- [2] 刘小燕, 陈棉彪, 李良忠, 等. 云南会泽铅锌冶炼厂周边土壤重金属污染特征及健康风险评价[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(3): 221-229.  
LIU Xiao-yan, CHEN Mian-biao, LI Liang-zhong, et al. Contaminant characteristics and health risk assessment of heavy metals in soils from lead-zincs melting plant in Huize County, Yunnan Province, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2016, 33(3): 221-229.
- [3] 楚纯洁, 周金凤. 平顶山矿区丘陵坡地土壤重金属分布及污染特征[J]. 地理研究, 2014, 33(7): 1383-1392.  
CHU Chun-jie, ZHOU Jin-feng. Distribution and pollution of soil heavy metals in hilly upland around Pingdingshan coal mining area[J]. *Geographical Research*, 2014, 33(7): 1383-1392.
- [4] 李三中, 徐华勤, 陈建安, 等. 某矿区神碱渣堆场周边土壤重金属污染评价及潜在生态风险分析[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(6): 1141-1148.  
LI San-zhong, XU Hua-qin, CHEN Jian-an, et al. Pollutions and potential ecological risk of heavy metals in soils around waste arsenic-containing alkaline sites[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(6): 1141-1148.
- [5] 王腾飞, 谭长银, 曹雪莹, 等. 长期施肥对土壤重金属积累和有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(2): 257-263.  
WANG Teng-fei, TAN Chang-yin, CAO Xue-ying, et al. Effects of long-term fertilization on the accumulation and availability of heavy metals in soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(2): 257-263.
- [6] Zhao F, Ma Y, Zhu Y, et al. Soil contamination in China: Current status and mitigation strategies[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(2): 750-759.
- [7] 王世玉, 吴文勇, 刘 菲, 等. 典型污灌区土壤与作物中重金属健康风险评估[J]. 中国环境科学, 2018, 38(4): 1550-1560.  
WANG Shi-yu, WU Wen-yong, LIU Fei, et al. Assessment of human health risks of heavy metals in the typical sewage irrigation areas[J]. *China Environmental Science*, 2018, 38(4): 1550-1560.
- [8] Wang F, Li C, Wang J, et al. Concentration estimation of heavy metal in soils from typical sewage irrigation area of Shandong Province, China using reflectance spectroscopy[J]. *Environmental Science & Pollution Research International*, 2017, 24(20): 16883-16892.
- [9] Alghobar M A, Suresha S. Evaluation of metal accumulation in soil and tomatoes irrigated with sewage water from Mysore City, Karnataka, India[J]. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 2015, 16(1): 49-59.
- [10] 杨伟红, 李振华, 王雪梅. 开封市污灌区土壤重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 河南农业科学, 2016, 45(11): 53-57.  
YANG Wei-hong, LI Zhen-hua, WANG Xue-mei. Heavy metal pollution and potential ecological risk assessment in sewage irrigation area of Kaifeng City[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2016, 45(11): 53-57.
- [11] 宁翠萍, 李国琛, 王颜红, 等. 细河流域农田土壤重金属污染评价及来源解析[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(3): 487-495.  
NING Cui-ping, LI Guo-chen, WANG Yan-hong, et al. Evaluation and source apportionment of heavy metal pollution in Xihe watershed farmland soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(3): 487-495.
- [12] 许晓玲, 呼世斌, 刘晋波, 等. 施用污泥堆肥对土壤中重金属累积和大豆产量的影响[J]. 环境工程, 2018, 36(3): 108-111.  
XU Xiao-ling, HU Shi-bin, LIU Jin-bo, et al. Effect of sewage sludge compost on soybean: Heavy metal accumulation and yield[J]. *Environmental Engineering*, 2018, 36(3): 108-111.
- [13] 王社平, 程晓波, 刘新安, 等. 施用污泥堆肥对草莓生长及土壤重金属的影响[J]. 环境工程学报, 2017, 11(7): 4375-4382.  
WANG She-ping, CHENG Xiao-bo, LIU Xin-an, et al. Effects of application of sewage sludge on heavy metal in soil and strawberry growth[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, 11(7): 4375-4382.
- [14] 陈怀满. 环境土壤学[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 49-50.  
CHEN Huai-man. Environmental edaphology[M]. Beijing: Science Press, 2010: 216-217.
- [15] 王美娥, 彭 驰, 陈卫平. 宁夏干旱地区工业区对农田土壤重金属累积的影响[J]. 环境科学, 2016, 37(9): 3532-3539.  
WANG Mei-e, PENG Chi, CHEN Wei-ping. Impacts of industrial zone in arid area in Ningxia Province on the accumulation of heavy metals in agricultural soils[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(9): 3532-3539.
- [16] Marrugo-Negrete J, Pinedo-Hernández J, Díez S. Assessment of heavy metal pollution, spatial distribution and origin in agricultural soils along the Sinú River Basin, Colombia[J]. *Environmental Research*, 2017, 154: 380-388.
- [17] 杨克敌. 环境卫生学[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2004: 200.  
YANG Ke-di. Environmental hygiene[M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2004: 200.
- [18] 环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[R]. 北京: 环境保护部, 国土资源部, 2014.  
Ministry of Environmental Protection, Ministry of Land and Resources. Communique on national survey of soil pollution status[R]. Beijing: Ministry of Environmental Protection, Ministry of Land and Resources, 2014.
- [19] 樊新刚, 米文宝, 马振宁, 等. 宁夏石嘴山河滨工业园区表层土壤重金属污染的时空特征[J]. 环境科学, 2013, 34(5): 1887-1894.  
FAN Xin-gang, MI Wen-bao, MA Zhen-yu, et al. Spatial and tempo-



- ral characteristics of heavy metal concentration of surface soil in Hebin industrial park in Shizuishan northwest China[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(5):1887-1894.
- [20] 罗成科, 毕江涛, 肖国举, 等. 宁东基地不同工业园区周边土壤重金属污染特征及其评价[J]. *生态环境学报*, 2017, 26(7):1221-1227.
- LUO Cheng-ke, BI Jiang-tao, XIAO Guo-ju, et al. Pollution characteristics and assessment of heavy metals in soil of different industry zones of Ningdong base in Ningxia, China[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, 26(7):1221-1227.
- [21] 潘佳颖, 王建宇, 王超, 等. 贺兰山东麓葡萄主产区土壤重金属分布特征及污染评价[J]. *干旱区资源与环境*, 2017(6):173-178.
- PAN Jia-ying, WANG Jian-yu, WANG Chao, et al. Distribution characteristics and pollution assessment for the main grape base soil heavy metals at the eastern foot of Helan Mountain in Ningxia[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2017(6):173-178.
- [22] 包长征. 对开展国家现代农业示范区农业改革与建设试点的思考——以贺兰县为例[J]. *宁夏农林科技*, 2013, 54(12):79-84.
- BAO Chang-zheng. A thinking on carrying on pilot agricultural reform and construction in national modern agricultural demonstration zone: With Helan County as an example[J]. *Ningxia Agriculture and Forestry Technology*, 2013, 54(12):79-84.
- [23] 马广福, 包长征, 张亚娟, 等. 贺兰县耕地土壤盐渍化现状与改良对策[J]. *宁夏农林科技*, 2014, 55(11):26-32.
- MA Guang-fu, BAO Chang-zheng, ZHANG Ya-juan, et al. Current situation of soil salinization of cultivated land in Helan County and improvement countermeasures[J]. *Ningxia Agriculture and Forestry Technology*, 2014, 55(11):26-32.
- [24] 葛焕松. 暖泉农场耕地土壤盐渍化现状及改良措施[J]. *宁夏农林科技*, 2013, 54(8):43-45.
- GE Huan-song. Current situation of salinization of soil of Nuanquan farm and measures for improvement[J]. *Ningxia Agriculture and Forestry Technology*, 2013, 54(8):43-45.
- [25] 马维新, 马广福, 李广成. 贺兰县测土配方施肥现状及建议[J]. *宁夏农林科技*, 2015, 56(2):25-26.
- MA Wei-xin, MA Guang-fu, LI Guang-cheng. Current situation of formula fertilization by soil testing in Helan County and suggestions[J]. *Ningxia Agriculture and Forestry Technology*, 2015, 56(2):25-26.
- [26] 李飒, 李陇堂, 岳自恒. 贺兰县现代农业发展及对策研究[J]. *农业科学研究*, 2012, 33(3):81-87.
- LI Sa, LI Long-tang, YUE Zi-heng. The study of the modern agricultural development and countermeasures[J]. *Journal of Agricultural Sciences*, 2012, 33(3):81-87.
- [27] 曹艳春, 冯永忠, 杨引禄, 等. 基于GIS的宁夏灌区农田污染源结构特征解析[J]. *生态学报*, 2011(12):3468-3477.
- CAO Yan-chun, FENG Yong-zhong, YANG Yin-lu, et al. GIS analysis of structural characteristics of pollution sources in irrigable farmland in Ningxia China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011(12):3468-3477.
- [28] 杨晓娟, 靳军良, 王金保. 宁夏水环境污染成因分析与评价[J]. *宁夏农林科技*, 2014, 55(11):46-48.
- YANG Xiao-juan, JIN Jun-liang, WANG Jin-bao. Analysis and evaluation of causes of water environment pollution in Ningxia[J]. *Ningxia Agriculture and Forestry Technology*, 2014, 55(11):46-48.
- [29] 孙正风, 王金保, 马京军. 宁夏污水灌溉对土壤和农产品质量的影响[J]. *宁夏农林科技*, 1999, 40(4):7-11.
- SUN Zheng-feng, WANG Jin-bao, MA Jing-jun. The effect of Ningxia sewage irrigation on the quality of soil and agricultural products[J]. *Ningxia Agriculture and Forestry Technology*, 1999, 40(4):7-11.
- [30] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000:10-18.
- BAO Shi-dan. Soil agricultural chemistry analysis[M]. 3rd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000:10-18.
- [31] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(8):975-1001.
- [32] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990:330-381.
- China Environmental Monitoring Center. Chinese soil element background value[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990:330-381.
- [33] 张鹏岩, 秦明周, 陈龙, 等. 黄河下游滩区开封段土壤重金属分布特征及其潜在风险评价[J]. *环境科学*, 2013, 34(9):3654-3662.
- ZHANG Peng-yan, QIN Ming-zhou, CHEN Long, et al. Study on distribution characteristics and potential ecological risk of soil heavy metals in the Yellow River beach region in Kaifeng City[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(9):3654-3662.
- [34] 环境保护部. 土壤环境质量标准 GB 15618—1995[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2006.
- Ministry of Environmental Protection. Environmental quality standard for soils GB 15618—1995[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2006.
- [35] 吕建树, 张祖陆, 刘洋, 等. 日照市土壤重金属来源解析及环境风险评价[J]. *地理学报*, 2012, 67(7):971-984.
- LÜ Jian-shu, ZHANG Zu-lu, LIU Yang, et al. Sources identification and hazardous risk delineation of heavy metals contamination in Rizhao City[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(7):971-984.
- [36] Wilding L P. Spatial variability: Its documentation, accommodation and implication to soil survey[M]//Nielsen D R, Bouman J. Soil spatial variability. Wageningen: The Netherlands, 1985:166-194.
- [37] 张爱平, 杨世琦, 易军, 等. 宁夏引黄灌区水体污染现状及污染源解析[J]. *中国生态农业学报*, 2010, 18(6):1295-1301.
- ZHANG Ai-ping, YANG Shi-qi, YI Jun, et al. Analysis on current situation of water pollution and pollutant sources in Ningxia Yellow River irrigation region[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(6):1295-1301.
- [38] 张爱平. 宁夏引黄灌区农业非点源污染评价[J]. *生态学杂志*, 2013, 32(1):156-163.
- ZHANG Ai-ping. An assessment of agricultural non-point source pollution in Ningxia irrigation region, northwest China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(1):156-163.
- [39] Luo L, Ma Y, Zhang S, et al. An inventory of trace element inputs to agricultural soils in China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90(8):2524-2530.
- [40] Wang Y Q, Shao M A, Gao L. Spatial variability of soil particle size distribution and fractal features in water-wind erosion crisscross region on the Loess Plateau of China[J]. *Soil Science*, 2010, 175(12):579-585.